

·测试、试验与仿真·

等效相移光栅反射光谱特性的研究

王晓瑞, 谷 健

(哈尔滨工业大学 深圳研究生院 电子与信息工程学院, 广东 深圳 518000)

摘要:等效相移光栅的原理是,通过对取样光纤布拉格光栅在特定点进行毫米尺度的“位移”,经过傅里叶变换,在各频率通道产生“等效相移”。首先利用光栅的Turan传输矩阵进行数值模拟,验证了真实相移光栅的各种性质在等效相移光栅中的实现,然后针对当前关于等效相移光栅的报道中,-2级光栅反射率都很低,并且没有出现“等效相移”的情况,提出了一种实现-2级等效相移光栅的方法,并进行了仿真验证。最后给出了等效相移光栅反射率随长度变化的曲线。

关键词:等效相移光栅;传输矩阵;反射率;占空比;-2级

中图分类号: O433.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1673-1255(2015)-03-0062-05

Research on Equivalent Phase-shifted Fiber Bragg Grating's Reflection Spectrum Characteristics

WANG Xiao-rui, GU Jian

(School of Electronic and Information Engineering, Harbin Institute of Technology, Shenzhen Graduated School, Shenzhen 518000, China)

Abstract: The principle of equal-phase shifted fiber Bragg grating is that by introducing a spatial shift at certain position of sampling fiber Bragg grating, equivalent phase shift can be achieved in different frequency channel after Fourier transformation. Firstly, the fiber Bragg grating Turan transmission matrix is used to perform number simulation, and all kinds of phase shifted fiber Bragg grating's properties are verified in equal-phase shifted fiber Bragg grating. Secondly, according to the report that -2 grade fiber Bragg grating has low reflectivity and equal-phase shifted state can't be realized, a method for realizing -2 grade equal-phase shifting is proposed and relative verification is performed. Finally, the relationship curve of equal-phase shifted fiber Bragg grating reflectivity changing with length is given.

Key words: equal-phase-shifted fiber Bragg grating (FBG); transmission matrix; reflectivity; duty ratio; -2 grade

相移光栅是一种重要的光学元件,其优点是在窄带宽的反射谱中存在一条超窄带宽的透射峰,可以通过级联的方法制作超窄带滤波器,但是其制作工艺比较复杂,原因是需要在相移位置对光栅进行亚微米尺度的位移操作^[1-3]。等效相移光栅通过对取样光栅在某些位置进行毫米或亚毫米尺度的位移,

可以在各频率光栅中引入“等效相移”^[4],这降低了位移光栅制作的工艺复杂度,而且是多频率通道的“等效相移”^[5-6],在制作多波长超窄带滤波器方面有重要的前景。实验上,清华大学陈向飞等人用等效相移光栅与普通光纤光栅级联,制作出了双波长超窄带(0.1 pm量级)滤波器,并利用超窄带滤波器制

收稿日期:2015-06-10

基金项目:2015深港ICT青年创业计划资助

作者简介:王晓瑞(1992-),男,山东省德州市人,在读硕士研究生,主要研究方向为多波长单纵模光纤激光器;谷健(1989-),男,山西省朔州市人,在读硕士研究生,主要研究方向为多波长单纵模光纤激光器。

作出双波长单纵模激光器^[7-8]。国内关于等效相移光栅的报道很少,文中对等效相移光栅进行了详细研究,希望能为等效相移光栅的设计制造提供参考。首先利用光栅的Turan传输矩阵^[9-10]进行数值仿真,验证了真实相移光栅的各种性质在等效相移光栅中的实现,然后针对当前关于等效相移光栅的报道中,-2级光栅反射率都很低,并且没有出现“等效相移”的情况,提出了一种实现-2级等效相移光栅的方法,并进行了仿真验证。最后给出了等效相移光栅反射率随长度变化的曲线。

1 等效相移光栅原理

等效相移光栅的原理可由式(1)~式(4)说明。式(1)表示折射率沿着 z 方向变化的普通取样光栅的折射率分布; Λ 为光栅周期; $s(z)$ 为取样函数; Δn 为折射率调制深度。式(2)为取样函数的傅里叶表示形式。 F_m 为 m 级傅里叶级数; p 为取样周期。

$$\Delta n(z) = s(z)\Delta n \exp(j\frac{2\pi z}{\Lambda}) + c.c. \quad (1)$$

$$s(z) = \sum_m F_m \exp(j\frac{2m\pi z}{p}) \quad (2)$$

若在 $z > z_0$ 时,令取样函数改变为 $s(z + \Delta p)$,则新的折射率调制函数可表示为式(3)。

$$\Delta n(z) = \begin{cases} \sum_m \Delta n F_m \exp(j\frac{2\pi z}{\Lambda} + j\frac{2m\pi z}{p}) & z \leq z_0 \\ \sum_m \Delta n F_m \exp(j\frac{2\pi z}{\Lambda} + j\frac{2m\pi z}{p} + j2m\pi q) & z > z_0 \end{cases} \quad (3)$$

$$q = \frac{\Delta p}{p} \quad (4)$$

其中, q 为相对位移量,表示位移量绝对值与取样周期长度的比值,取值介于0~1之间。式(3)表示的光栅可以被看成包含着 m 级不同的光栅,每一个 m 值都对应着一个周期不同的光栅,并且在 z_0 点有一个大小为 $2m\pi q$ 的相移。由于取样周期长度一般在毫米或亚毫米量级,所以位移量的大小也在毫米或亚毫米量级,降低了光栅制作工艺复杂度,这就是等效相移光栅的原理。

2 真实相移光栅的性质在等效相移光栅中的对应实现

这部分主要通过数值仿真,验证真实相移光栅的性质在等效相移光栅中的对应实现。这些性质包括:多相移光栅中,相移点数量决定反射光谱中

窄透射峰的数量;单相移光栅中,相移点位置决定反射光谱中窄透射峰的透射强度,相移量大小决定反射光谱中窄透射峰的位置。在等效相移光栅中,位移点的数量等于等效相移点的数量,位移点的位置为等效相移点的位置,位移量的大小决定等效相移量的大小。

2.1 位移量决定相移量

由式(3)、式(4)知,等效相移量大小与 q 值有关。令位移点位置 z_0 为等效相移光栅长度的一半,相对位移量 q 分别为 $q_1 = 1/2$, $q_2 = 3/8$, $q_3 = 1/4$, $q_4 = 1/8$,对应 $m = -1$ 级光栅的等效相移量分别为 $-\pi$, $-3\pi/4$, $-\pi/2$, $-\pi/4$,得到-1级等效相移光栅的反射光谱如图1所示。实线对应 q_1 ,双划线对应 q_2 ,虚线对应 q_3 ,点画线对应 q_4 。从图1中可以看出, $q = 1/2$ 时,-1级光栅在 z_0 处产生了 $-\pi$ 相移,在反射带中间位置出现了窄透射带。随着 q 值的减小,等效相移量的绝对值减小,透射带开始向短波长方向漂移,直至消失。所以可以通过调整 q 值对某级光栅反射谱内的透射峰位置进行调谐。这与真实相移光栅中,相移量不同时透射峰位置不同相符合。

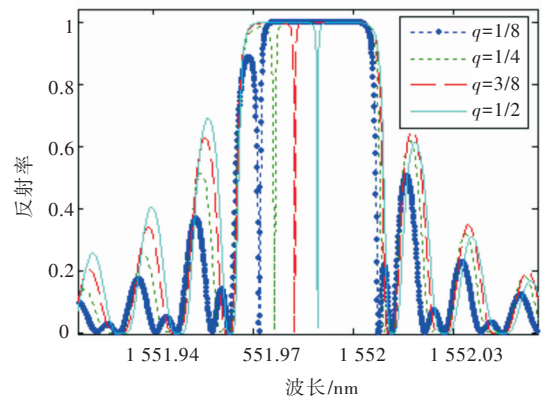
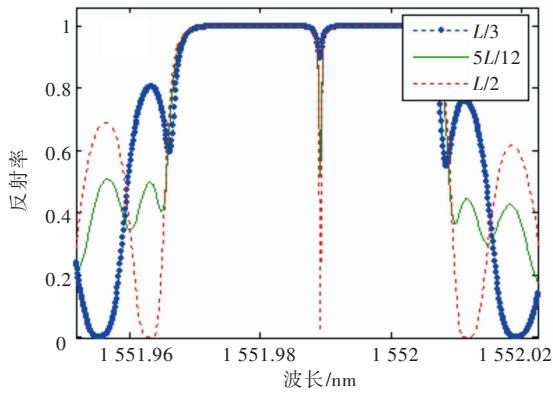


图1 位移量不同时-1级光栅反射光谱

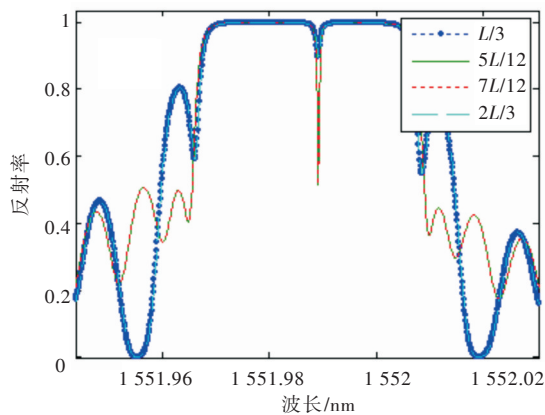
2.2 位移点位置等于相移点位置

令 $q = 1/2$, L 表示光栅总长度, z_0 的值分别为 $z_{01} = L/3$, $z_{02} = 5L/12$, $z_{03} = L/2$, $z_{04} = 7L/12$, $z_{05} = 2L/3$,得到-1级光栅的反射光谱如图2a所示。图2a中,点画线对应 z_{01} ,实线对应 z_{02} ,虚线对应 z_{03} 。可以看到, z_0 为 $L/2$ 时,透射强度最大,随着 z_0 逐渐偏离 $L/2$,透射强度逐渐减小。图2b中,点画

线对应 z_{01} , 实线对应 z_{02} , 虚线对应 z_{04} , 双划线对应 z_{05} 。可以看到, z_{01} 与 z_{05} 的反射光谱重合, z_{02} 与 z_{04} 的反射光谱重合。所以透射强度的减小只与 $(z_0 - L/2)$ 的绝对值大小有关, 与 z_0 偏离 $L/2$ 的方向无关。



(a)



(b)

图2 位移点位置不同时-1级光栅反射光谱

2.3 位移点数量等于相移点数量

图3为位移点数量大于1时-1级光栅的反射光谱图。点画线对应在 $z_{01} = L/3$, $z_{11} = 2L/3$ 处分别引入 $q = 1/2$ 的位移, 双划线对应在 $z_{02} = L/3$, $z_{12} = L/2$, $z_{22} = 2L/3$ 处, 分别引入 $q = 1/2$ 的位移, 实线对应在 $z_{03} = L/6$, $z_{13} = L/3$, $z_{23} = 2L/3$, $z_{33} = 5L/6$ 处, 分别引入 $q = 1/2$ 的位移。可以看出, 位移点的数量等于反射谱中窄透射峰的数量。这与真实相移光栅中, 相移点数量等于反射谱中窄透射峰的数量相一致。

3 实现-2级等效相移光栅的方法

-2级光栅与-1级光栅相比, 同0级光栅的频率

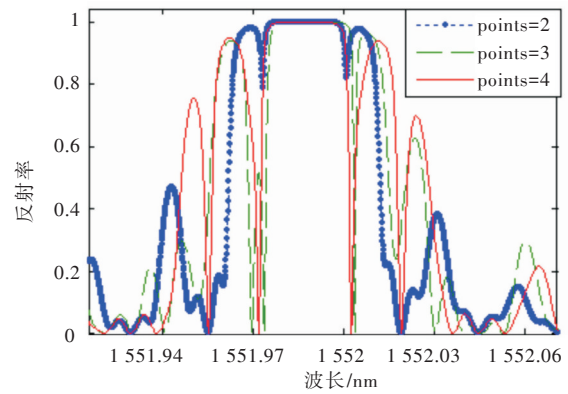


图3 位移点数量不同时-1级光栅反射光谱

差更大, 这一部分分析了式(2)、式(3)中 F_m 的具体形式, 找到了一种实现-2级等效相移光栅的方法。式(5)为取样函数在时域上的表示形式, p 为取样周期长度; T 为取样周期占空比。

$$s(z) = \begin{cases} 1 & np < z < (n+T)p \\ 0 & \text{others} \end{cases} \quad (5)$$

由式(3)知, m 级光栅的折射率调制深度为 $\Delta n |F_m|$, 由式(2)、式(5)可得

$$F_m = T \frac{\sin(m\pi T)}{m\pi T} \exp(-jm\pi T) \quad (6)$$

$$|F_m| = \begin{cases} T & m = 0 \\ \left| \frac{\sin(m\pi T)}{m\pi} \right| & m \neq 0 \end{cases} \quad (7)$$

由式(7)知, 占空比 T 可以改变 $|F_m|$ 的值, 进而改变 m 级光栅的折射率调制深度。-1级光栅的等效相移量为 $-\pi$ 时, $q = 1/2$, $T = 1/2$, 此时-2级光栅的等效相移量为 -2π , $|F_2| = 0$, 其他偶数级光栅(0级除外)的傅里叶级数也都为零, 所以-2级光栅无法产生反射。为了使-2级光栅获得最大折射率调制深度, 可令式(7)中的分子 $|\sin(-2\pi T)| = 1$, 可取 $-2\pi T = -\pi/2$, 得到 T 等于 $1/4$ 。由式(3), 为了使-2级光栅产生 $-\pi$ 相移, 令 $-2\pi q = -\pi$, 得到 $q = 1/4$ 。此时-1级光栅的等效相移量为 $-\pi/2$, $|F_1| = \sqrt{2}/2\pi$ 。

图4为仿真得到的等效相移光栅反射光谱。图4a对应 $q = 1/2$, $T = 1/2$ 。图4b对应 $q = 1/4$, $T = 1/2$ 。图4c对应 $q = 1/4$, $T = 1/4$ 。图4d为图4c中-2级反射光谱的放大图。可以看到, $q = 1/2$, $T = 1/2$ 时, -2级光栅几乎没有反射, 有限的反射来源于取样周期数量的有限性。 $q = 1/4$, $T = 1/2$ 时, -2级光栅的等效相移量为 $-\pi$, 但由于折射率调制深

度为0,仍几乎没有反射。 $q = 1/4, T = 1/4$ 时, -2 级光栅反射率明显提高,反射谱中间出现窄透射峰。通过令 $mT\pi = -\pi/2, 2mq\pi = -\pi$,还可以实现其他偶数级的等效相移光栅,但 $|m|$ 值太大时,由式(7)知, $|F_m|$ 的表达式中分母变得很大,导致 $|F_m|$ 值减小,无法实现很高的反射率。

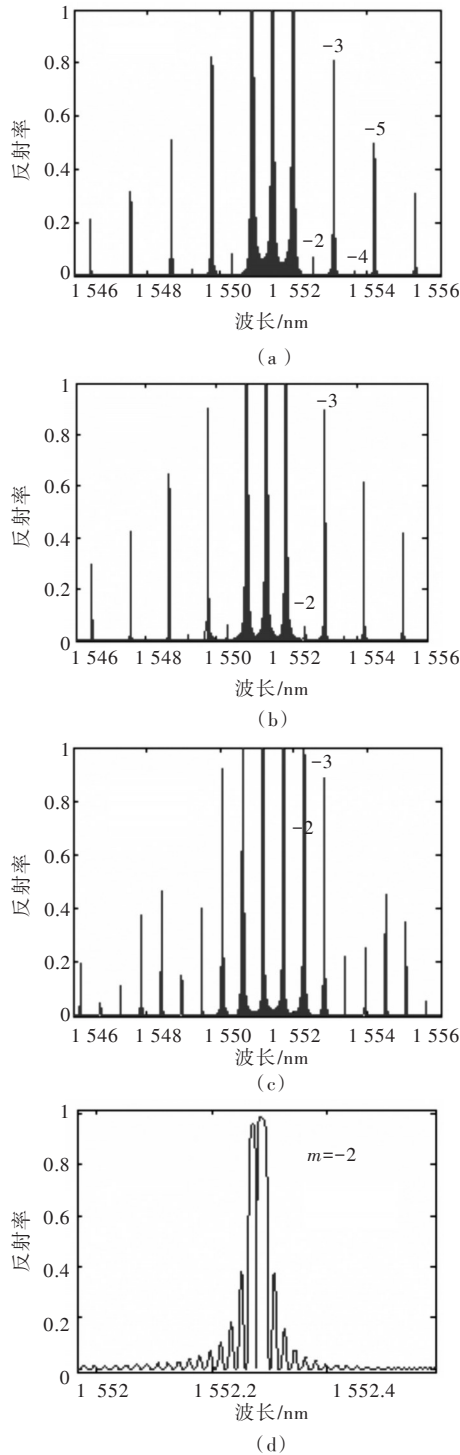


图4 占空比 T 、位移量 q 不同时等效相移光栅反射光谱

4 光栅最大反射率与光栅长度的关系

保持等效相移光栅取样周期数等于60不变, $q = 1/2, T = 1/2$, 仿真得到等效相移光栅最大反射率与取样周期长度 p 的关系如图5实线所示。period=536 nm,指的是被带位移取样函数调制的普通光栅的周期为536 nm,对应反射中心波长约为1551.4 nm。图中横坐标为长度,单位为 $-dB^*m$,也就是以米为单位的长度取以10为底的对数,再乘以-10,纵坐标为最大反射率,单位为 $-dB$ 。

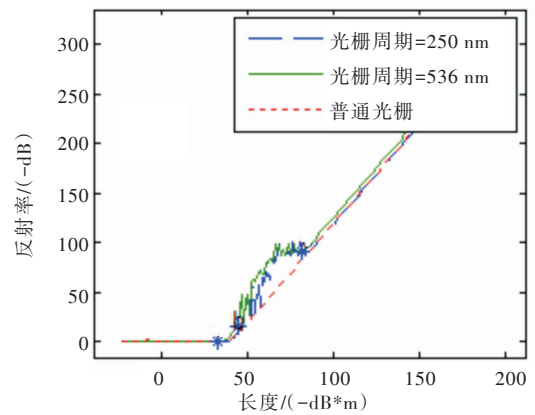


图5 等效相移光栅最大反射率与 p 值的关系

从图中可以看到,在 a 点, $p = 0.474$ mm,为被调制光栅周期的885倍,经过 a 点后反射率迅速下降。在 b 点, $p = 0.03$ mm,为被调制光栅周期的56倍,经过 b 点后,光栅最大反射率小于0.01。在 c 点, $p = 5.97$ nm,为被调制光栅周期的0.01倍,经过 c 点后,取样周期长度每下降1 dB,光栅最大反射率下降2 dB。虽然在 c 点取样周期太小,在实际中已经无意义,但是经过 c 点后的两倍关系仍是使人感兴趣的,不清楚这种关系是光栅真实的性质还是仿真的误差,用光栅的 G. P. Agrawal 传输矩阵^[11]重新仿真同样得到了这种关系。改变被调制光栅周期,令 period=250 nm,在反射中心波长723.6 nm附近扫描最大反射率,得到的最大反射率与取样周期长度的关系如图5双划线所示。中心波长为1551.4 nm的普通光栅的最大反射率与光栅长度的关系如图5虚线所示。可以看到,对上述两种光栅,仿真中的经过 c 点后的两倍关系仍然存在。

5 结 论

首先通过数值仿真验证了真实相移光栅的各种性质都能通过调整参数在等效相移光栅中实现, 这些性质包括: (1) 等效相移量大小决定各级光栅反射谱中窄透射峰位置, 相移量大小可以通过调节位移量改变; (2) 单相移光栅中, 相移点偏离光栅中心位置越大, 各级光栅反射谱中窄透射峰的透射强度越低, 且与偏离中心位置的方向无关, 位移点的位置就是相移点的位置; (3) 多相移光栅中, 相移点的数量等于反射谱中窄透射峰的数量。位移点的数量等于相移点的数量。然后通过分析等效相移光栅的傅里叶频谱, 发现通过使取样函数占空比为 $1/4$, 相对位移量为 $1/4$, 可以实现 -2 级等效相移光栅, 并给出了获得其他偶数级等效相移光栅的公式, 即 $mT\pi = -\pi/2$, $2mq\pi = -\pi$ 。最后通过数值仿真, 给出了在取样周期数量不变的情况下, 等效相移光栅最大反射率与取样周期长度关系的曲线。

参 考 文 献

- [1] Kashyap R, McKee P F, Arnes D. UV written reflection grating structures in photosensitive optical fibers using phase-shifted phase-masks[J]. *Electron. Lett.*, 1994,30(23):1977-1979.
- [2] Loh W H, Cole M J, Zervas M N, et al. Complex grating structures with uniform phase masks based on the moving fiber-scanning beam technique[J]. *Opt. Lett.*, 1995,20(20):2051-2053.
- [3] Canning J, Sceats M G. π -phase-shifted periodic distributed structures in optical fibers by UV post-processing[J]. *Electron. Lett.*, 1994,30(16):1344-1345.
- [4] Dai Y T, Chen X F, Jiang D J, et al. Equivalent phase shift in a fiber Bragg grating achieved by changing the sampling period[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004,16(10):2284-2286.
- [5] Feng J, Chen X, Fan C, et al. A novel method to achieve various equivalent chirp profiles in sampled Bragg gratings using uniform-period phase masks[J]. 2002,2005:71-75.
- [6] Chen X, Xu X, Zhou M, et al. Tunable dispersion compensation in a 10 Gb/s optical transmission system by employing a new tunable dispersion compensator[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004,16:188-190.
- [7] Chen X, Yao J, Deng Z. Ultranarrow dual-transmission-band fiber Bragg grating filter and its application in a dual-wavelength single-longitudinal-mode fiber ring laser[J]. *Opt. Lett.*, 2005,30(16):2068-2070.
- [8] Chen X. Photonic generation of microwave signal using a dual-wavelength single-longitudinal-mode fibre ring laser[J]. *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, 2006, 54:804-809.
- [9] Yariv A. Coupled-mode theory for guided-wave optics[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1973, QE-9:919-933.
- [10] Erdogan T. Fiber grating spectra[J]. *Journal of Lightwave Technol.*, 1997,15(8):1277-1294.
- [11] Agrawa G P I. Modeling of distributed feedback semiconductor lasers with axially-varying parameters[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1988,24(12):2407-2414.
- [7] 艾小川, 张琪, 李胜勇. 基于微处理器 8031 电路板的 TPS 开发研究[J]. *计算机测量与控制*, 2006, 14(2):177-178, 208.
- [8] 李明辉, 刘连生, 曲培树. 基于虚拟仪器的自动测试系统研究[J]. *电子测试*, 2008(3):37-42.
- [9] 霍立平, 杨春英, 初晓军. 面向信号的 TPS 的开发[J]. *中国测试技术*, 2006, 32(1):132-134.
- [10] 夏梦芝, 何银菊, 李波. 基于虚拟仪器的控制器自动测试系统[J]. *仪表技术与传感器*, 2011(12):58-60, 63.

(上接第 61 页)

计算机与数字工程, 2013, 41(4):670-672.